

文章编号: 1000-7598 (2009) 03-0746-05

考虑蠕变性状港区软土地基 参数反演和长期沉降预测

史旦达¹, 周健^{2,3}, 贾敏才^{2,3}, 杨永香²

(1.上海海事大学 海洋环境与工程学院, 上海 200135; 2.同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;
3.同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 结合上海某集装箱码头建设项目, 针对本工程深厚淤泥质黏土的场地条件, 引入 Mesri 蠕变模型考虑堆场地基的长期蠕变变形。利用施工期和工后短期实测分层沉降资料, 由最小二乘法建立目标函数, 运用分层迭代反演方法反演得到各软土层的黏弹性参数; 将反演得到的土层参数代入自行编制的沉降计算软件, 计算得到地基沉降量, 并将计算值与实测值进行对比, 对比结果证明了参数反演的可靠性; 利用反演得到的土层参数对工后的长期沉降进行了预测, 为本工程的安全运营提供了指导。

关键词: 软土地基; 地基沉降; 蠕变; 参数反演; 长期沉降预测

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

Back analysis of parameters and long-term settlement prediction of harbor soft ground considering its creep behavior

SHI Dan-da¹, ZHOU Jian^{2,3}, JIA Min-cai^{2,3}, YANG Yong-xiang²

(1. College of Ocean Environment and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on a harbor construction project in Shanghai, the Mesri creep model is introduced to depict the creep deformation behavior of the soft ground. The viscoelastic parameters of Mesri model are determined by back analysis of field monitoring data. The objective function is established by least square method, and the variables are optimized. Taking into account the layered property of soft ground, iterative back analysis layer by layer method is used. Back analyzed parameters are substituted into the self-programmed software to calculate the settlement. The comparison between calculated result and measured result confirms the reliability of back analysis. At last, the long-term ground settlement after construction is predicted on the basis of the results of back analysis.

Key words: soft ground; ground settlement; creep; back analysis of parameters; long-term settlement prediction

1 前言

我国沿海港口建设多为软土地基, 由于软土的蠕变特性, 地基沉降除需考虑主固结沉降外, 还恰当考虑次固结沉降^[1]。研究表明, 主固结沉降和次固结沉降并不能截然划分, 两者相互作用又相互影响, 软土地基沉降具有固结-蠕变耦合效应^[2]。詹美礼等^[3]研究了上海打浦路隧道软黏土地基沉降问题, 结果表明, 次固结沉降约占主固结沉降的 14%,

不可忽略。目前, 关于软土蠕变变形的研究可分理论方法和经验方法。理论方法采用流变元件模型表述软土变形的黏弹塑性, 这种方法思路明确、概念清晰, 缺点是参数较多且较难确定, 因此, 工程应用受到限制。经验方法直接从室内试验结果出发建立应力-应变-时间经验关系, 能较好反映工程土体的蠕变性状, 缺点是应力水平和应力状态与现场实际不符, 且受取样扰动影响, 能否准确反映实际软土地基的沉降特性还有待进一步研究。

收稿日期: 2008-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 90815008); 上海市教委支出预算项目 (No. 2008076); 浙江省科技计划面上项目 (No. 2008C23023)。

第一作者简介: 史旦达, 男, 1979年生, 博士, 讲师, 主要从事港口工程软基处理、土体细观力学模拟等方面的研究工作。E-mail: shidanda@163.com

在地基实测沉降资料基础上, 反演计算参数, 并以此为依据对后期沉降作出预测, 这种反演分析方法能够全面反映现场各要素综合影响, 实用性强, 受到了工程界的重视^[4]。吕庆等^[5]研究了高填方路堤的长期蠕变问题, 对黏弹性参数进行反演。谭昌明等^[6]对成层软土路堤黏弹性参数进行了反演, 提出了分层迭代反演方法。俞亚南等^[7]在文献[6]基础上, 进一步提出分层分部迭代反演方法。然而, 目前的反演分析大多针对公路软土路堤进行, 港口工程地质条件复杂, 上部荷载面积大、作用深, 因此, 研究港口工程软土地基的蠕变特性和参数反演具有重要工程实际意义。

本文结合上海某集装箱码头建设项目, 引入 Mesri 蠕变模型考虑上海地区典型淤泥质黏土的蠕变特性。利用施工期和工后短期监测得到的分层沉降资料, 由最小二乘法建立目标函数, 运用分层迭代反

演方法反演得到各软土层的黏弹性参数, 并在此基础上对工后长期沉降作出预测。

2 场区地质条件

工程建设场地位于上海市长江入海口南岸, 为长江潮滩地带。勘察报告揭示的原始土层为: ①淤泥质粉质黏土层, 平均厚度约 6.5 m; ②淤泥质黏土层, 平均厚度约 6.2 m; ③淤泥质粉质黏土层, 平均厚度约 5.4 m; ④灰绿色黏土层, 平均厚度约 4.8 m; ⑤灰色粉砂层, 平均厚度约 15.7 m。各土层主要物理力学指标列于表 1。

由于原始地面标高较低, 不满足港区堆场和道路的设计标高要求, 上部吹填细砂形成港区堆场, 吹填细砂层平均厚度 4.0m 左右。吹填细砂层的地基处理采用无填料振冲和低能量强夯工艺。

表 1 土层物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical properties of soils

土层	平均厚度 / m	天然重度 γ / (kN/m ³)	压缩模量 E_s / MPa	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)	固结系数 C_v / (cm/s ²)
①淤泥质粉质黏土	6.5	17.9	3.1	11.0	16.0	2.28×10^{-3}
②淤泥质黏土	6.2	17.3	2.0	8.0	11.5	1.51×10^{-3}
③淤泥质粉质黏土	5.4	18.0	3.3	12.5	17.5	2.03×10^{-3}
④灰绿色黏土	4.8	19.5	3.6	10.5	18.0	2.96×10^{-3}
⑤灰色粉砂	15.7	19.4	7.9	8.0	27.0	6.30×10^{-3}

3 上海淤泥质黏土 Mesri 蠕变模型

软土的工程性质具有区域性, 文献[8]针对上海地区典型淤泥质黏土进行了蠕变试验研究, 提出了适用于上海地区淤泥质黏土的 Mesri 蠕变模型型式。

以下简要介绍 Mesri 蠕变模型及其模型参数, 具体内容可参阅文献[8-9]。

针对 Singh-Mitchell 蠕变模型只能预测土体 20%~80% 剪应力水平范围内应力-应变行为的缺陷, Mesri 等^[9]研究提出用双曲线型应力-应变硬化模型代替 S-M 模型中的指数型应力-应变关系。

3.1 Singh-Mitchell 蠕变模型

Singh-Mitchell 在总结土体蠕变试验资料基础上, 提出如下的经验公式:

$$\dot{\varepsilon} = Ae^{\beta \bar{D}} \left(\frac{t_1}{t} \right)^m \quad (1)$$

式中: A 、 β 、 m 为参数; t_1 为参考时间; \bar{D} 为剪应力水平。 β 、 m 与 t 、 \bar{D} 相对无关。

式 (1) 积分后简化为

$$\varepsilon = Be^{\beta \bar{D}} \left(\frac{t}{t_1} \right)^\lambda \quad (2)$$

式中: $B = \frac{At_1}{1-m}$, $\lambda = 1-m$ 。

3.2 双曲线型应力-应变关系

Kondner^[10]较早提出用双曲线型应力-应变关系来描述常速率轴向加载条件下土体的变形特性, 公式为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (3)$$

初始切线模量

$$E_u = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon} = \frac{1}{a} \quad (4)$$

极限主应力差

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} = \frac{1}{b} \quad (5)$$

破坏比 R_f 为

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{1/b} \quad (6)$$

将式(4)~(6)代入式(3), 得到

$$\varepsilon = \frac{2}{E_u/S_u} \frac{\bar{D}}{1 - R_f \bar{D}} \quad (7)$$

式中: $S_u = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为不排水抗剪强度; $\bar{D} =$

$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$ 为剪应力水平。

3.3 Mesri 蠕变模型及其参数

将式(7)与式(2)结合得到 Mesri 蠕变方程:

$$\varepsilon = \frac{2}{E_u/S_u} \frac{\bar{D}}{1 - R_f \bar{D}} \left(\frac{t}{t_1} \right)^\lambda \quad (8)$$

模型有 3 个参数, 即 $\frac{2}{E_u/S_u}$ 、 R_f 、 λ 。室内试

验时可由 $\frac{\varepsilon}{D} - \varepsilon$ 和 $\log \varepsilon - \log t$ 关系曲线求得。

文献[8]分析了上海淤泥质黏土三轴蠕变试验结果, 得到了 4 个典型土样的 Mesri 蠕变模型参数, 如表 2 所示(文献[8]中为表 3)。其中, 参考时间 $t_1 = 1$ d。

表 2 室内试验得到的 Mesri 模型参数值^[8]

Table 2 Parameters of Mesri model obtained by lab tests^[8]

土样号	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ / kPa	$\frac{2}{E_u/S_u}$	R_f	$\bar{\lambda}$
土样 1	334	0.040 1	0.855	0.043 3
土样 2	209	0.016 2	0.877	0.054 6
土样 3	145	0.044 6	0.345	0.039 7
土样 4	133	0.022 3	0.834	0.066 8

4 实测沉降和参数反演

利用上述的 Mesri 蠕变模型表述本工程软土地基的蠕变变形。模型参数由施工期和工后短期分层沉降实测资料反演得到。考虑到地基的成层特性, 参数反演采用分层迭代反演方法。

4.1 实测沉降

堆场面层浇筑前, 在主要堆场区域和道路轴线位置埋设分层沉降管, 监测施工期和使用期地基土层的分层沉降。在主要堆场区域布置 8 个测点, 编号为 A1~A8; 场区道路轴线位置布置 2 个测点, 编号为 B1~B2。分层沉降管埋深均为 30 m, 可监测到第⑤层灰色粉砂层。在分层沉降监测点附近设置地表沉降监测点, 监测地表沉降。

分层沉降管埋设稳定 1 周后读取初始值, 在场地施工阶段平均每周观测 1 次, 场地施工结束后第 1 年内平均每月观测 1 次, 以后平均每 3 个月观测 1 次。

以堆场区 A1~A8 测点为例, 图 1(a)、(b)、(c) 分别为监测 300 d 内 A5、A6、A7 测点的实测分层沉降曲线。

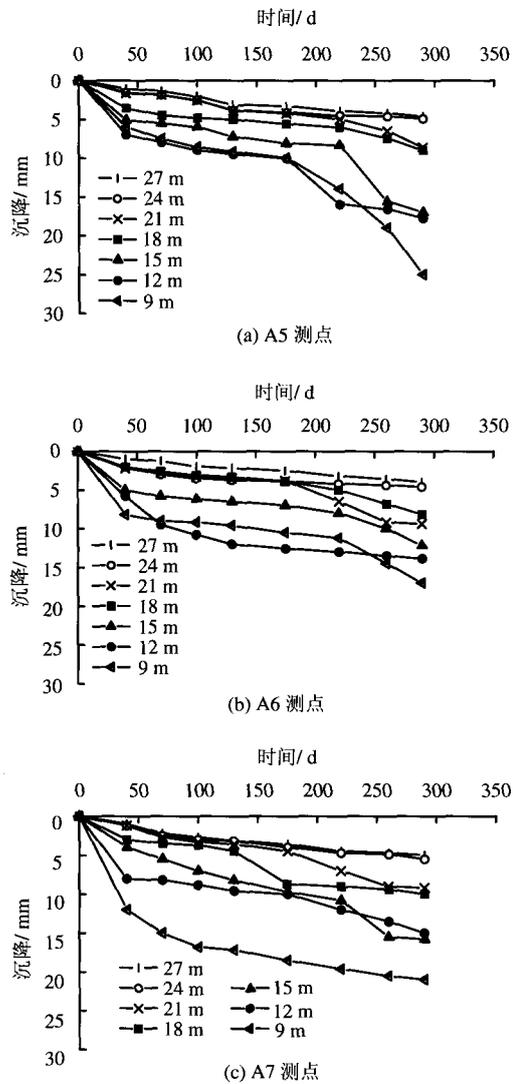


图 1 实测分层沉降曲线

Fig.1 Layered settlement curves observed on site

将 A1~A8 监测点的实测结果进行统计平均, 得到堆场区场地的分层沉降平均曲线, 如图 2 所示。

4.2 目标函数

采用最小二乘法建立目标函数, 根据观测值和计算值的相对误差和绝对误差可以建立不同的目标函数形式。文献[6]研究表明, 对于地基沉降问题, 宜采用绝对误差形式, 目标函数形式为

$$J = \sum_{i=1}^n (u_i - u_i^*)^2 \quad (9)$$

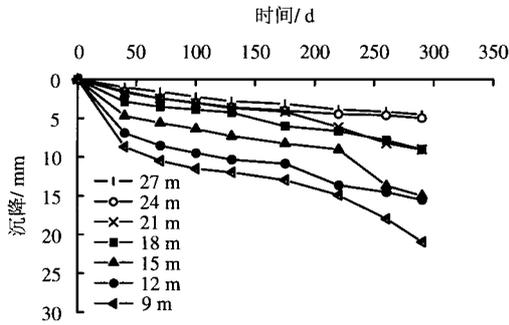


图2 实测分层沉降平均曲线
Fig.2 Average curves of layered settlement

式中： n 为观测值总数； u_i^* 、 u_i 分别为第 i 个观测值和相对应的计算值。

目前对于非线性问题的位移反分析，通常采用基于优化求解的直接反分析法^[11]。该法将参数反演问题转化为目标函数的寻优问题。这种方法的优点是直接利用正分析的方法和过程，通过迭代最小误差函数，逐次修正未知参数的试算值，直至获得“最优解”。根据最小二乘原理，当式(9)取最小值时所对应的土层参数即反演得到的最优解。

4.3 分层迭代反演方法

实测地基沉降包括主固结沉降和次固结沉降。Mesri 蠕变模型描述了外荷作用下土体的应力-应变-时间关系，所以在某种程度上综合反映了软土地基沉降的固结-蠕变耦合效应。Mersi 蠕变模型的参数有 $\frac{2}{E_u/S_u}$ 、 R_f 和 λ 。针对本工程成层软土地基条件，采用分层迭代反演方法进行各软土层参数的反演，每层土 3 个参数。

文献[6]对成层软土地基参数反演的分层迭代反演方法进行了研究，结果表明，这种方法能够保证反演得到的土层参数物理上的合理性和数学上的唯一性。针对本工程实际情况，分层迭代反演方法的具体步骤如下：

(1) 分层及确定初始参数。自下而上对土层进行编号，下部灰色粉砂层和上部吹填细砂层不考虑蠕变，不参与反演。参与反演的 4 层软土层的初始计算参数引用文献[8]试验结果(列于表 2)，自下而上分别采用土样 1~土样 4 的结果。

(2) 分层反演。从最下面一层软土层开始，在假定其他软土层计算参数不变的前提下，利用该软土层的实测分层沉降资料反演确定该层土层参数 ($\frac{2}{E_u/S_u}$ 、 R_f 、 λ)，将反演得到的参数替代初始参数。然后，进行其上一层软土层的参数反演，直到最顶上一层软土层为止。

(3) 迭代。重复第(2)步，依次循环反演，直到前后两次反演所得参数的最大差值小于某一容许值为止，即各待定参数接近一个稳定值。

4.4 参数反演结果

用于蠕变参数反演的实测资料时间越长，反演得到的参数就越稳定^[7]。本文取实测 300 d 内的分层沉降资料进行反演。各软土层反演得到的参数列于表 3。

表3 反演分析得到的参数值
Table 3 Parameters obtained by back analysis

土层	$\frac{2}{E_u/S_u}$	R_f	λ
①淤泥质粉质黏土层	0.016 2	0.877	0.026 8
②淤泥质黏土层	0.012 2	0.887	0.024 6
③淤泥质粉质黏土层	0.016 2	0.897	0.024 6
④灰绿色黏土层	0.020 1	0.895	0.013 3

5 工后长期沉降预测

5.1 工后短期计算沉降与实测沉降的对比

为了验证参数反演的可靠性，将反演得到的参数代入自行编制的沉降计算软件，对工后短期沉降进行计算并与实测值对比。图 3(a)~(d)分别给出了 9、15、21、27 m 处计算分层沉降与实测沉降(A1~A8 平均值)的对比结果。由图 3 可见，计算沉降与实测沉降吻合较好，可以认为反演得到的土层参数符合工程实际，可以作为长期沉降预测的依据。

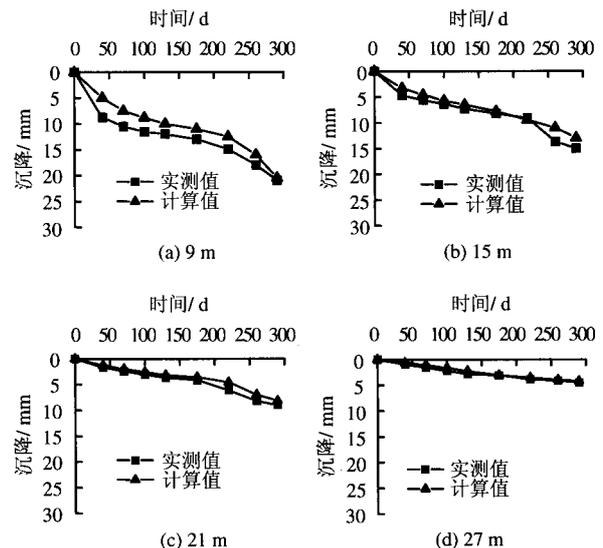


图3 计算值和实测值的对比

Fig.3 Comparison between calculated and observed values

5.2 工后长期沉降预测

利用反演得到的各土层参数计算地基的工后长期沉降。图 4 给出了工后 3 年内地表长期沉降发

展曲线。图4中实测值取自堆场区地表沉降监测点监测得到的地表沉降平均值。由图可知,大概工后2年左右,堆场的地表沉降开始趋于稳定,最终的地基沉降量在110 mm左右。

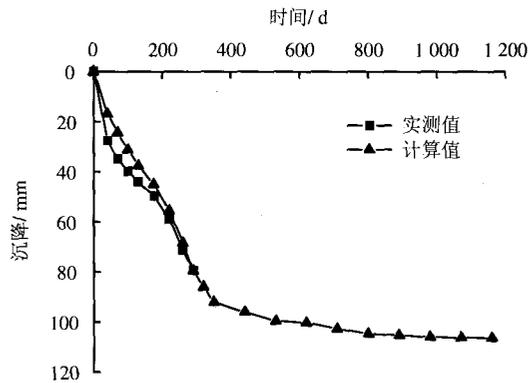


图4 工后长期沉降预测

Fig.4 Long-term ground settlement prediction

6 结论

(1) 引入 Mesri 蠕变模型描述上海地区典型淤泥质黏土的蠕变特性,由堆场实测分层沉降资料反演得到了模型的计算参数,弥补了由室内试验获取参数的不确定性;

(2) 由最小二乘法建立目标函数,采用分层迭代反演方法能保证各土层反演参数的唯一性,适用于成层软土地基的参数反演;

(3) 由计算得到的工后短期分层沉降与实测分层沉降结果吻合较好,保证了参数反演的可靠性;

(4) 利用反演得到的土层参数计算地基工后长期沉降,预测沉降能较好地反映港区软土地基后期沉降的发展趋势,为港区安全运营提供了指导。

参考文献

- [1] 邵光辉,刘松玉.海相结构软土的次固结研究[J].岩土力学,2008,29(8):2057-2061.
SHAO Guang-hui, LIU Song-yu. Research on secondary consolidation of structural marine clays[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(8): 2057-2061.
- [2] 赵维炳,施建勇.软土固结与流变[M].南京:河海大学出版社,1997.
- [3] 詹美礼,钱家欢,陈绪禄.上海软黏土的次固结实验及次固结计算的简化方法[J].港口工程,1993,(1):41-45.
ZHAN Mei-li, QIAN Jia-huan, CHEN Xu-lu. Simplified calculation method and lab test research on secondary consolidation of Shanghai soft clay[J]. *Harbor Engineering*, 1993, (1): 41-45.
- [4] 周健,闫东霄,贾敏才,等.某深水港土层固结系数反演及工后长期沉降预测[J].岩土力学,2008,29(5):1407-1410.
ZHOU Jian, YAN Dong-xiao, JIA Min-cai, et al. Back analysis of consolidation coefficient of soils and prediction of long term post-load settlement of a deep-water port[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1407-1410.
- [5] 吕庆,尚岳全,陈允法,等.高填方路堤黏弹性参数反演与工后沉降预测分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(7):1231-1235.
LÜ Qing, SHANG Yue-quan, CHEN Yun-fa, et al. Back analysis of visco-elastic parameters of filling materials and settlement prediction for high-filled embankment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(7): 1231-1235.
- [6] 谭昌明,周建,黄广龙.多层软土地基沉降的分层迭代反演综合预测法[J].中国公路学报,2001,14(4):28-32.
TAN Chang-ming, ZHOU Jian, HUANG Guang-long. Iterative back analysis layer by layer method to predict settlement of several layers soft clay ground[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2001, 14(4): 28-32.
- [7] 俞亚南,张仪萍,高庆丰.成层软土地基黏弹性参数反演及沉降预测[J].土木工程学报,2005,38(7):112-115.
YU Ya-nan, ZHANG Yi-ping, GAO Qing-feng. Inverse analysis of the viscoelastic parameters of layered soft ground and settlement prediction[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(7): 112-115.
- [8] 李军世,孙钧.上海淤泥质黏土的 Mesri 蠕变模型[J].土木工程学报,2001,34(6):74-79.
LI Jun-shi, SUN Jun. Mesri's creep model for Shanghai silt-clay[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(6): 74-79.
- [9] MESRI G, FEBRES-CORDERO E, SHIELD D R, et al. Shear stress-strain-time behavior of clays[J]. *Geotechnique*, 1981, 31(4): 537-552.
- [10] KONDER R L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, 1963, 89(1): 115-143.
- [11] 汪树玉,杨德铨,刘国华,等.优化原理、方法与工程应用[M].杭州:浙江大学出版社,1991.